

# Das heiße Universum - neue Ergebnisse der Röntgenastronomie

Trümper, Joachim

Veröffentlicht in:  
Jahrbuch 1993 der Braunschweigischen  
Wissenschaftlichen Gesellschaft, S.175-203



Verlag Erich Goltze KG, Göttingen

JOACHIM TRÜMPER

## **Das heiße Universum – neue Ergebnisse der Röntgenastronomie\***

### **Röntgenastronomie**

In den letzten Jahrzehnten hat sich die beobachtende Astronomie von dem schmalen Bereich des sichtbaren Lichts, der eine Oktave mißt, auf das ganze elektromagnetische Spektrum ausgedehnt. Heute werden mehr als sechzig Oktaven zwischen dem langwelligen Radiobereich und der hochenergetischen Gammastrahlung im TeV-Bereich genutzt. Triebfeder dieser Entwicklung war nicht zuletzt die Erkenntnis, daß die verschiedenen Spektralbereiche ganz unterschiedliche, komplementäre Einblicke in das kosmische Geschehen gestatten.

Zu den fruchtbarsten der neuen Spektralbereiche gehört die Röntgenastronomie, die den Bereich von 0.1–500 KeV Quantenenergie umfaßt und sich außerordentlich stürmisch entwickelt hat. Es sind vor allem die Phänomene am Ende der Sternentwicklung, die am Röntgenhimmel hervortreten: Supernovaexplosionen, Neutronensterne und Schwarze Löcher. Aber auch normale Sterne, die relativ schwache Röntgenstrahler sind, können mit modernen Röntgenteleskopen studiert werden. Im extragalaktischen Bereich dominieren am Röntgenhimmel einerseits „aktive Galaxien“ aller Art – wie Radiogalaxien, Seyfert-Galaxien, Quasare – und andererseits die Galaxienhaufen, die größten physikalischen Formationen in unserem Universum.

Die Emission von Röntgenstrahlung setzt extreme Bedingungen voraus: Sie entsteht oft als Strahlung heißer Gase, bei Temperaturen von Millionen bis Milliarden Grad. Weitere wichtige Erzeugungsmechanismen sind die Synchrotronstrahlung und der inverse Compton-Effekt, d. h. die Wechselwirkung hochenergetischer Elektronen mit kosmischen Magnetfeldern bzw. intensiven Photonenfeldern. Oft ist die Röntgenemission mit explosiven Vorgängen verbunden, die in der kosmischen Entwicklung eine ganz wesentliche Rolle spielen.

Die Röntgenastronomie ist eine Errungenschaft des Raumfahrtzeitalters. Der direkte Nachweis der Röntgenstrahlung der Sonne gelang nach dem zweiten Weltkrieg in den USA mit Hilfe erbeuteter V-2-Raketen. Die erste kosmische Röntgenquelle, Scorpius X-1, und die kosmische Röntgen-Hintergrundstrahlung wurden 1962 gleichzeitig durch Zufall mit einem Raketenexperiment der NASA entdeckt, dessen eigentliches Ziel gewesen war, die vom Mond reflektierte Röntgenstrahlung der Sonne nachzuweisen [1]. Es folgten zahlreiche Raketen- und Ballonexperimente und eine ganze Reihe von Röntgensatelliten, die mit großflächigen „Röntgenkollektoren“ ausgerüstet waren. Dazu gehörten vor allem 1971 der Uhuru-Satellit, mit dem die erste Himmelsdurchmusterung gemacht wurde, die etwa 339 Quellen erbrachte [2].

---

\* Vortrag bei der Jahresversammlung der Braunschweigischen Wissenschaftlichen Gesellschaft am 11. Juni 1993.

Zu diesen frühen Experimenten zählten auch ab 1972 unsere Ballon-HEXE und später die MIR-HEXE auf der sowjetischen Raumstation (1987–93), mit denen wir in Zusammenarbeit mit dem Astronomischen Institut der Universität Tübingen zahlreiche Messungen, vor allem an Neutronensternen und Schwarzen Löchern, gemacht haben. Ein Höhepunkt dieser Aktivitäten war die Entdeckung einer Zyklotronresonanzlinie im harten Röntgenspektrum des Neutronensterns Hercules X-1. Damit wurde es nun zum ersten Mal möglich, die Polfeldstärke eines solchen Objekts spektroskopisch zu bestimmen:  $5 \times 10^{12}$  Gauß =  $5 \times 10^8$  Tesla, das größte bisher gemessene Magnetfeld im Kosmos.

Ganz neue Möglichkeiten eröffneten sich mit der Einführung abbildender Röntgenteleskope, die auf einer Erfindung des Kieler Physikers Hans Wolter im Jahre 1951 beruhen [3]. Sie bestehen aus konfokalen und coaxialen Paraboloid- und Hyperboloidspiegeln, an denen nacheinander die Röntgenstrahlung unter streifendem Einfall reflektiert wird. Derartige „Wolterteleskope“ wurden zuerst im großen Stil im Skylab für Untersuchungen der Sonnenkorona eingesetzt und danach auf dem Einstein-Observatorium (1978–80) der NASA und dem EXOSAT (1983–86) der ESA. Auf dem Röntgensatelliten ROSAT wurde am 1. Juni 1990 ein Wolterteleskop gestartet, das um ein vielfaches leistungsfähiger ist als seine Vorgänger. Mit ihm sind die Beobachtungsgrenzen in der Röntgenastronomie weit hinausgeschoben worden.

## ROSAT

Hauptinstrument des Satelliten ist ein Röntgenteleskop mit vier ineinander geschachtelten Wolter-Spiegelsystemen, das fast eine Tonne wiegt. Es besitzt eine Winkelauflösung von 3.5 Bogensekunden und verfügt über zwei Röntgenbildwandler in der Fokalebene, die im Energiebereich 0.1–2.5 keV (entsprechend Wellenlängen 0,5–12.4 nm) arbeiten. Einer der Detektoren ist ein Vieldrahtproportionalzähler (PSPC) aus unserem Institut, der es gestattet, vier „Röntgenfarben“ aufzulösen, wobei die Winkelauflösung 25 Bogensekunden beträgt. Der zweite Detektor ist ein Kanalplattenvervielfacher (HRI), der „Schwarz-Weiß-Bilder“ mit 5 Bogensekunden Auflösung macht.

Neben dem Röntgenteleskop gibt es an Bord ein kleineres Extrem-Ultraviolett-Teleskop, das von einem englischen Konsortium gebaut wurde und das den ROSAT-Energiebereich zu kleineren Photonenenergien hin erweitert (0.03–0.1 keV). Eine detaillierte Beschreibung der Instrumente, ihrer Wirkungsweise sowie des Satelliten und seiner Systeme findet sich in den Physikalischen Blättern [4]. Abb. 1 zeigt eine Abbildung des Satelliten, und Tabelle 1 gibt einen Überblick über die Zusammenarbeit bei ROSAT.



*Abb. 1:  
Der Röntgensatellit ROSAT*

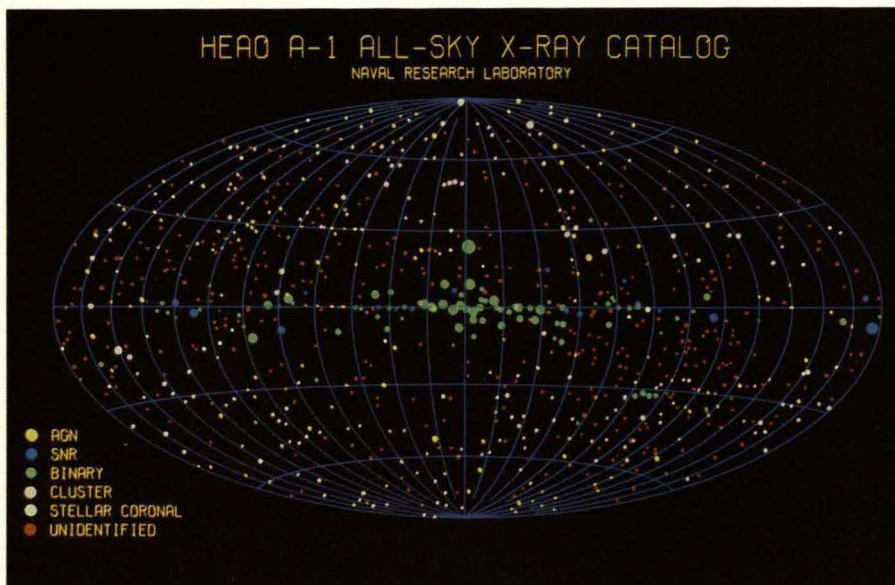


Abb. 2a

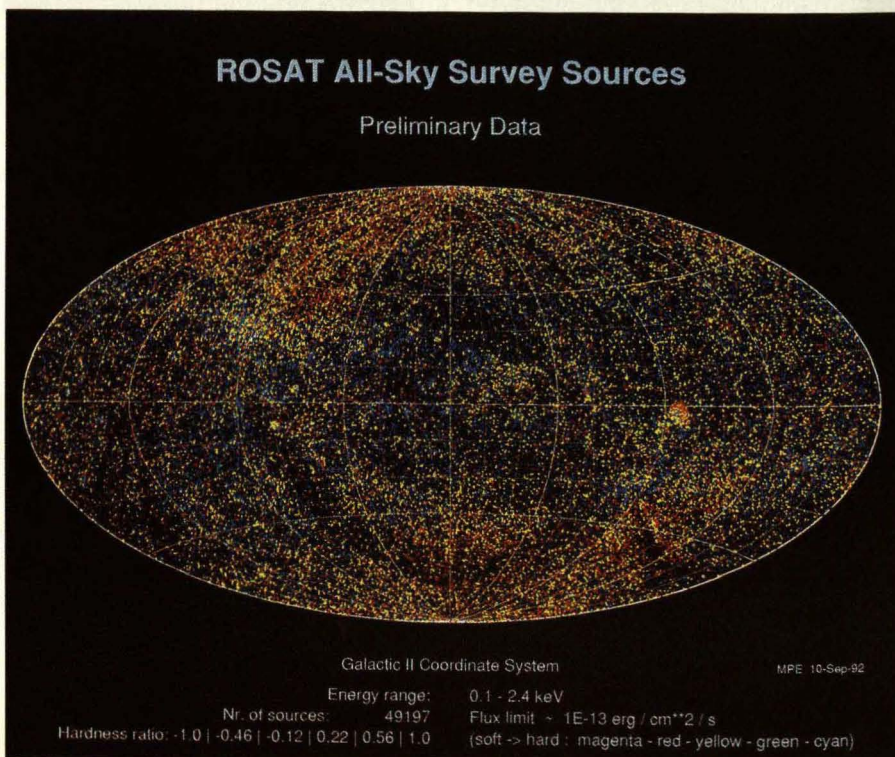


Abb. 2b



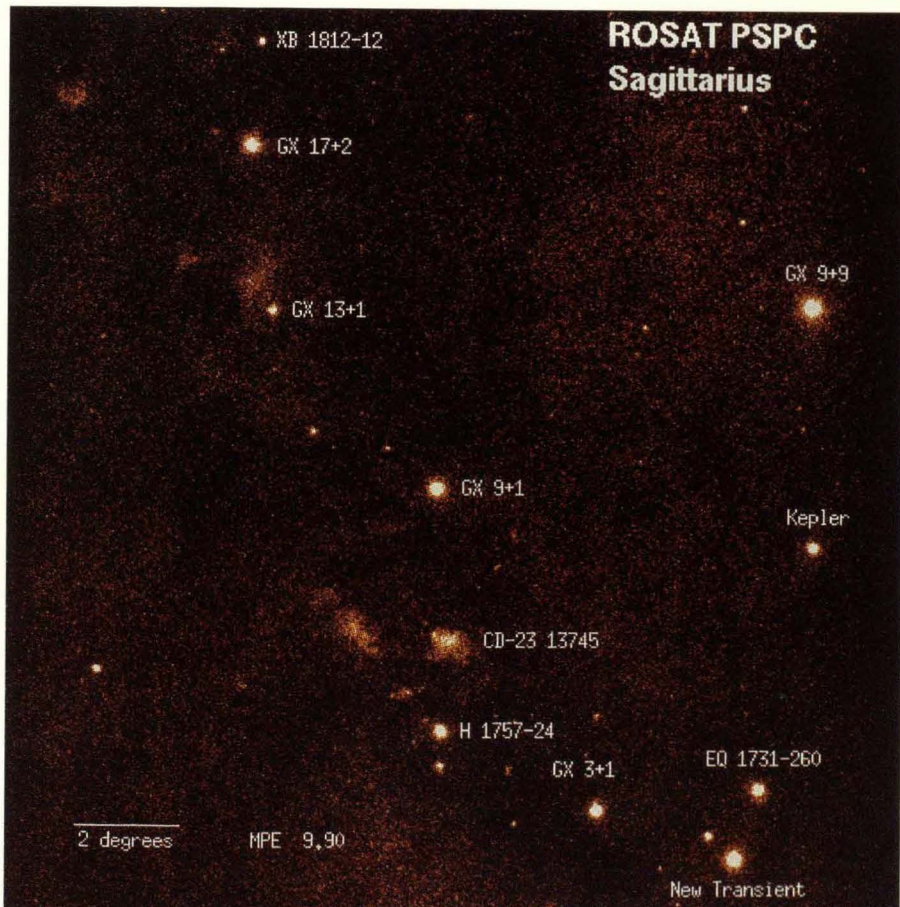


Abb. 3:

Ein Ausschnitt von ca.  $20 \times 20$  Grad in der Nähe des galaktischen Zentrums.

◁ Abb. 2 a:

Die Himmelskarte, die mit dem HEAO-1-Satelliten gewonnen wurde, umfaßt 840 Quellen. In der Mitte das galaktische Zentrum.

◁ Abb. 2 b:

Vorläufige Karte mit etwa 50.000 Rosat-Punktquellen. In der Mitte das galaktische Zentrum. Der Durchmesser der Kreise ist proportional zum Logarithmus der Intensität; die Farbe gibt Auskunft über das Spektrum (rot = weich, blau = hart).

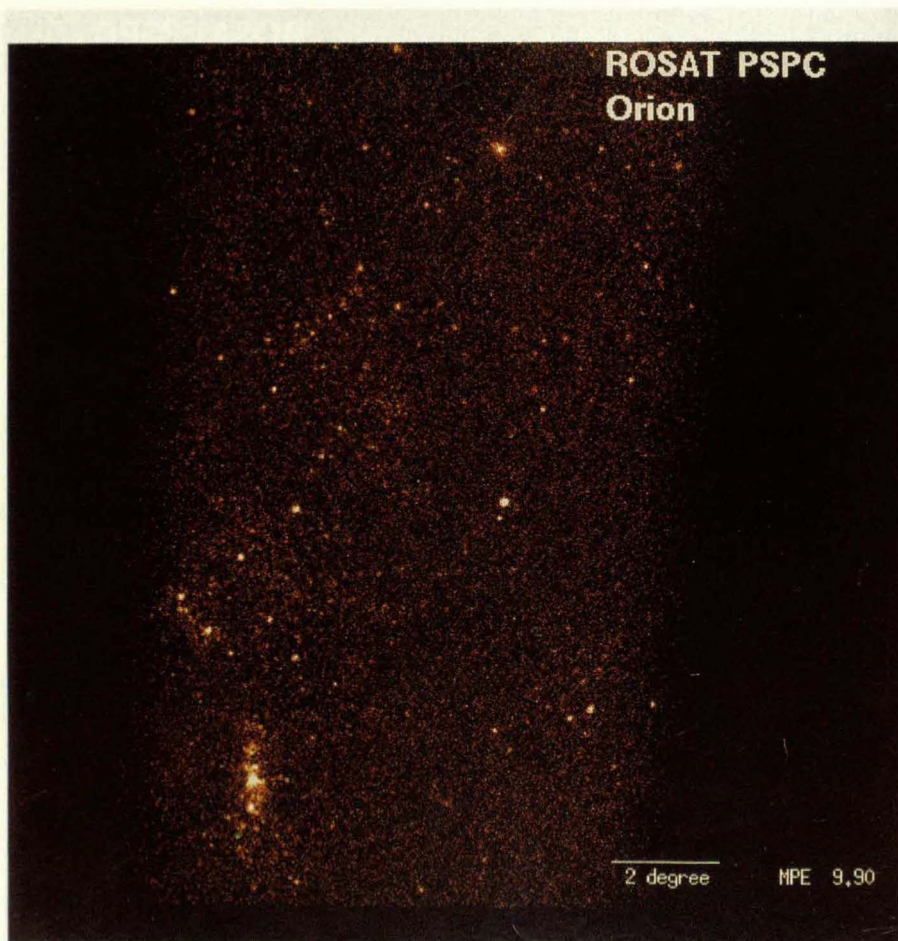
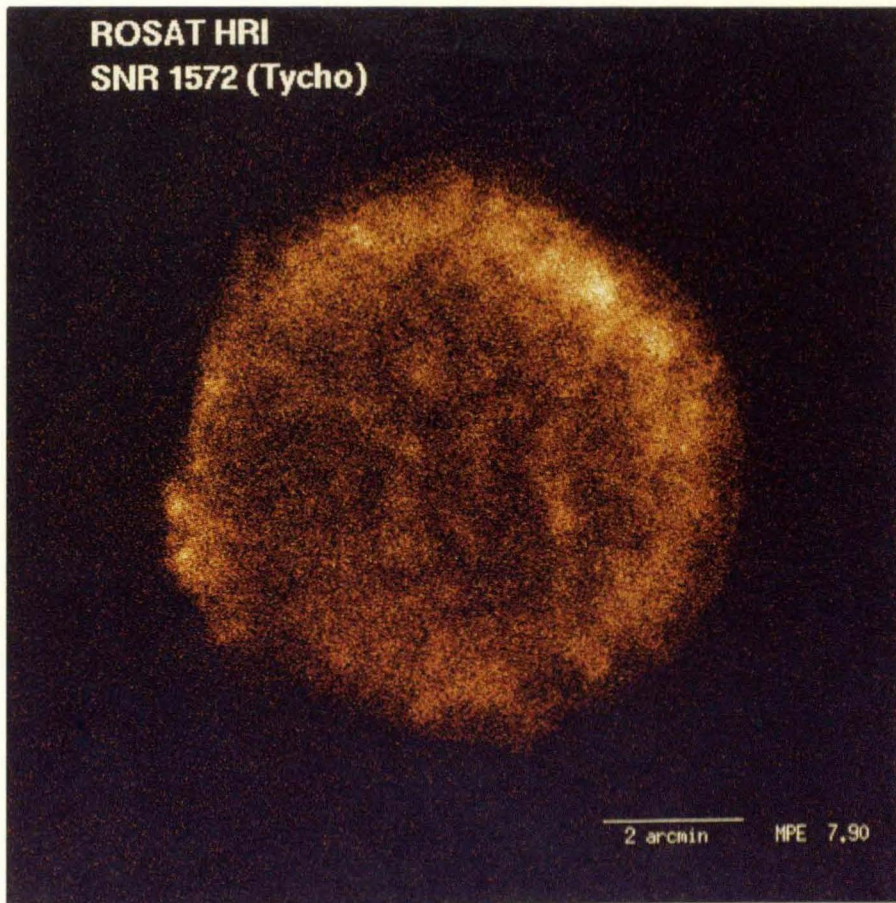


Abb. 4:

*Der Ausschnitt aus dem Sternbild Orion läßt die drei Gürtelsterne als Punktquellen und den Bereich des „Schwerts“ als diffuses Emissionsgebiet erkennen.*





*Abb. 5:*  
*Explosionswolke, die durch Tychos Supernova erzeugt wurde.*



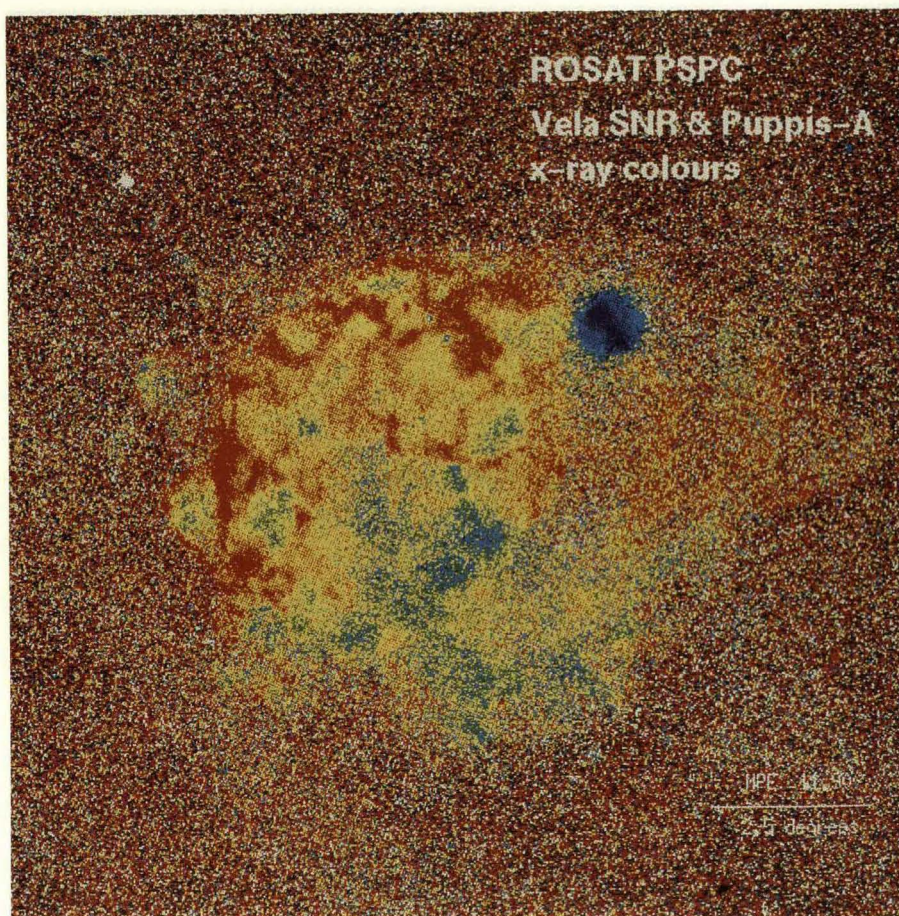


Abb. 6:  
*Röntgenfarbbild der Supernova-Überreste Vela und Puppis A (das blaue Objekt rechts oben).*



Abb. 7:

*Der Crabpulsar ist von einer toroidalen Emissionsregion umgeben. Daneben sind Jets zu erkennen, deren Richtung mit der der Rotationsachse des Pulsars übereinstimmt.*



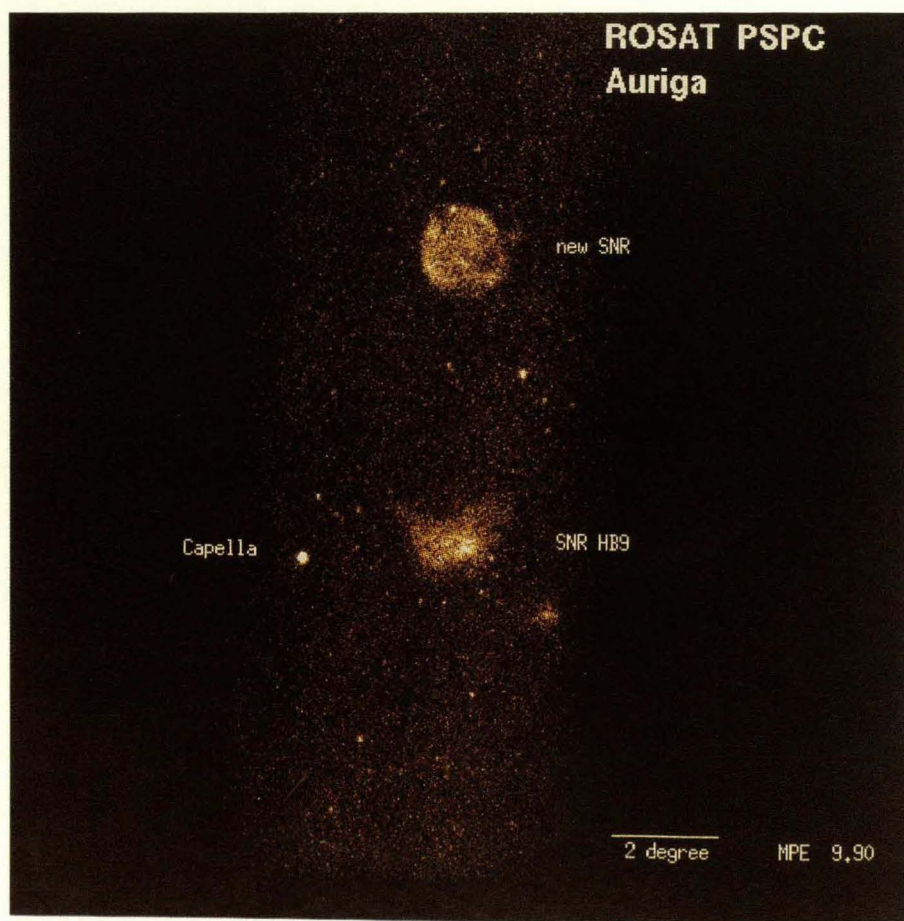


Abb. 8:

Eine der von ROSAT neu entdeckte „Supernovaexplosionswolke“, seitlich davon Capella und darunter der Supernovaüberrest HB9.



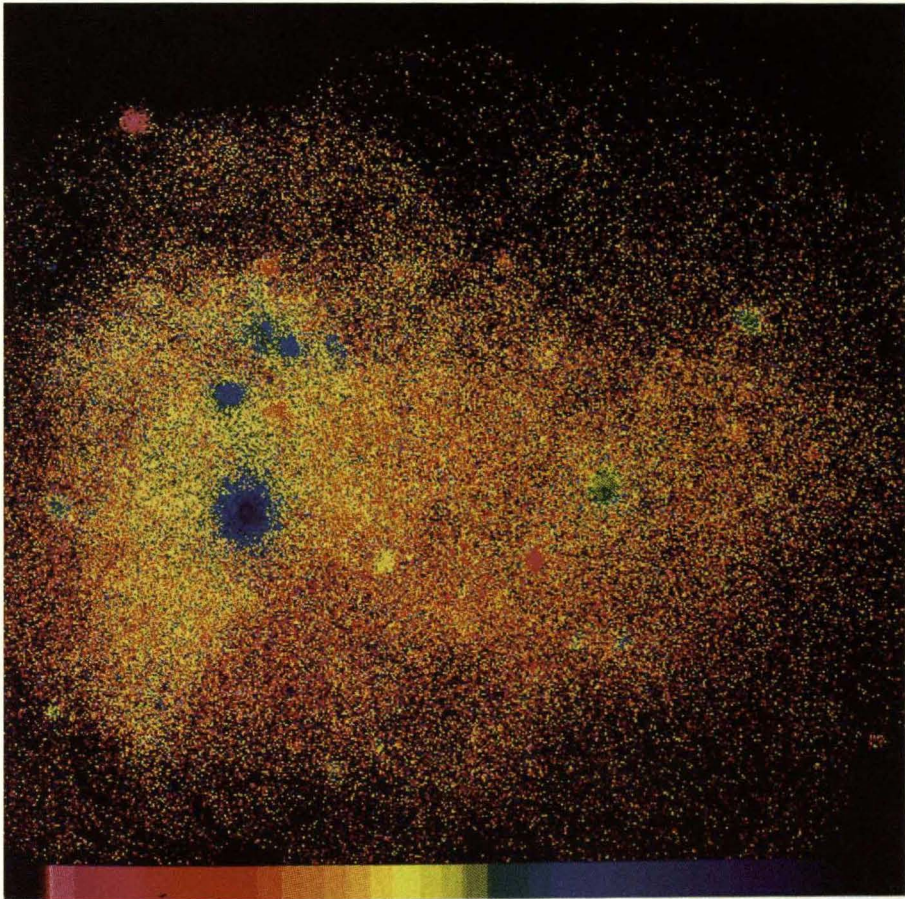


Abb. 9:

Das Zentralgebiet der Großen Magellan'schen Wolke zeigt zahlreiche Röntgenquellen. Die helle blaue Quelle links: LMC C-1, ein Doppelsternsystem, das wahrscheinlich ein Schwarzes Loch enthält, darüber links der 50 ms-Pulsar (blau), rechts davon ein K-Stern der Milchstraße (rot), darüber der Tarantelnebel mit zwei Supernovaüberresten.

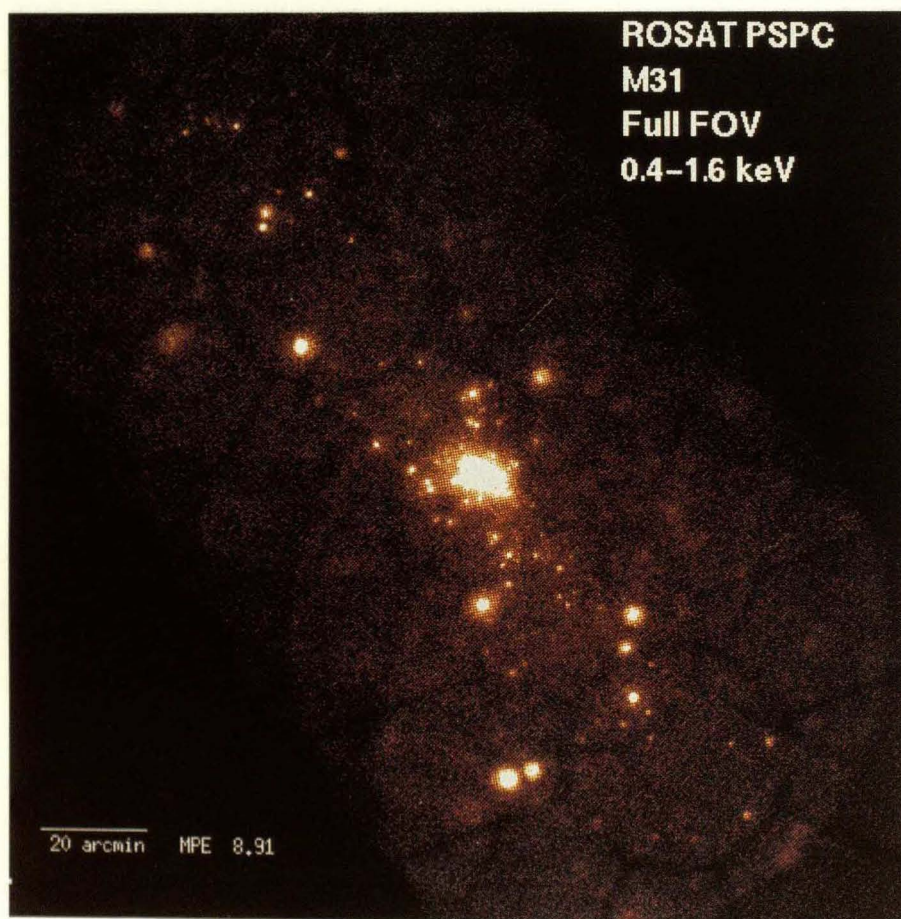
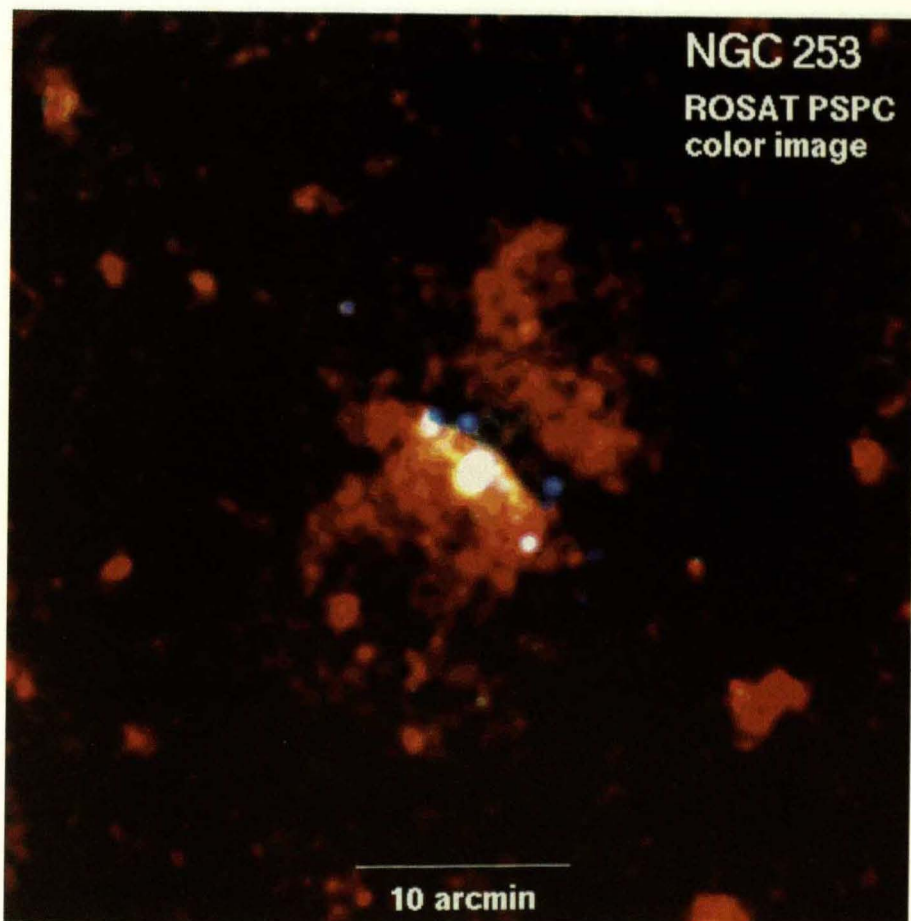


Abb. 10:

*Als Ergebnis einiger langer Detailbeobachtungen des Andromedanebels konnten in dieser Galaxie etwa 400 Röntgenquellen entdeckt werden. Dabei handelt es sich um Röntgendoppelsterne und Supernova-Überreste.*



*Abb. 11:*

*Röntgenbild der Starburst-Galaxie NGC 253. Die helle blaue Quelle sitzt im Zentrum der Galaxie und besteht aus etlichen Röntgendoppelsternen, deren Temperatur etwa bei 50 Millionen Grad liegt. Die beiden ausgedehnten roten Bereiche auf beiden Seiten der Galaxie stellen die diffuse Emission eines Halos dar, der eine Temperatur von etwa 2 Millionen Grad besitzt und sich bis zu Entfernungen von etwa 30.000 Lichtjahren erstreckt.*



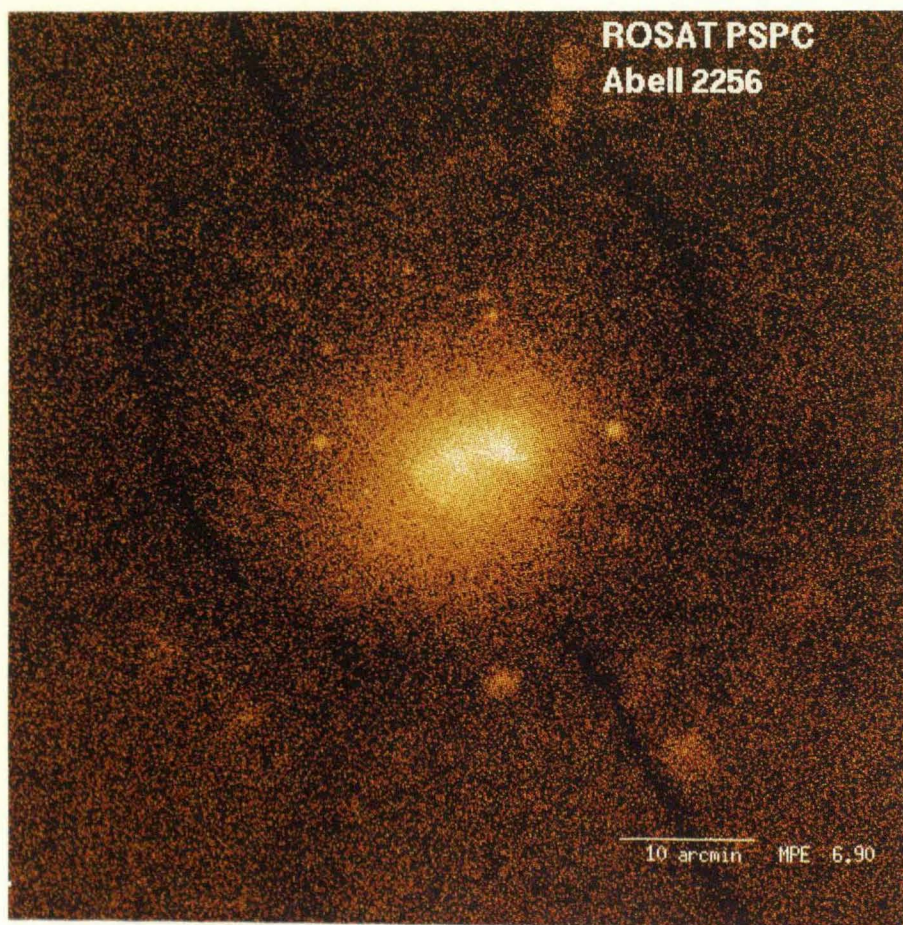


Abb. 12:

Die Röntgenemission des Galaxienhaufens Abell 2256 zeigt eine deutliche Doppelstruktur, die auf die Vereinigung zweier Haufen hindeutet.



Abb. 13:

*Vereinigung des Comahaufens mit einem kleineren Galaxienhaufen, der von rechts unten einfällt.*



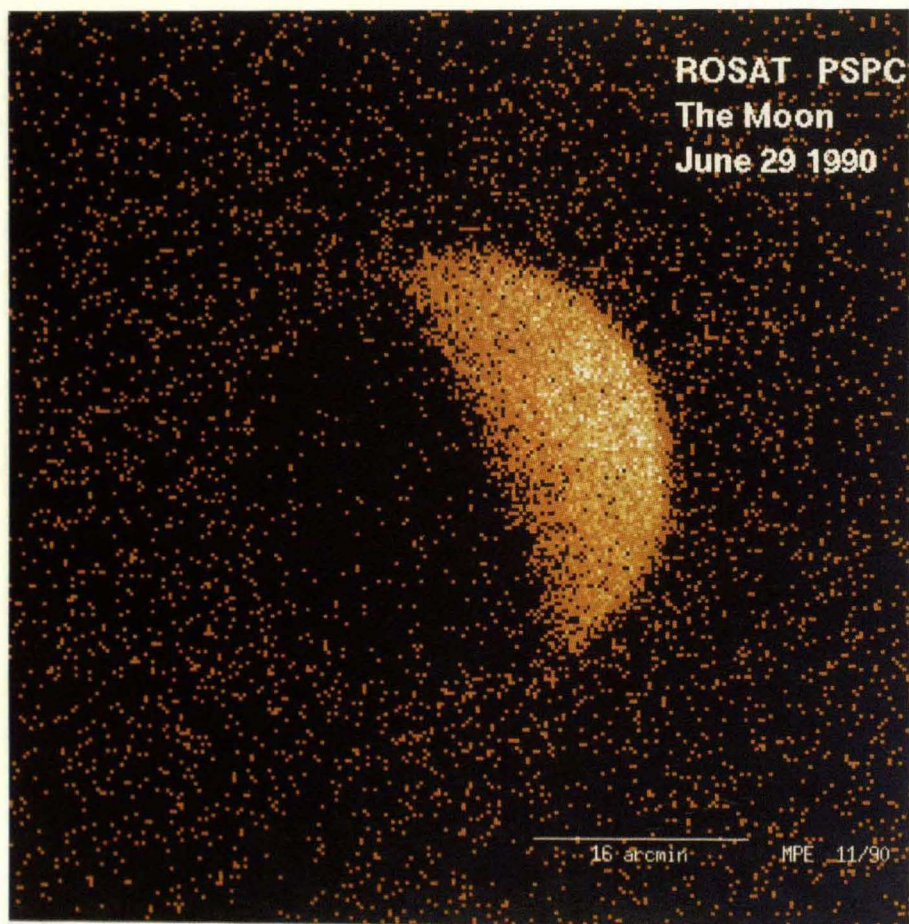


Abb. 14:

*Erstes Röntgenbild des Mondes. Von der sonnenbeschienenen Seite wird solare Röntgenstrahlung reflektiert. Der Mond schattet die diffuse Hintergrundstrahlung ab.*



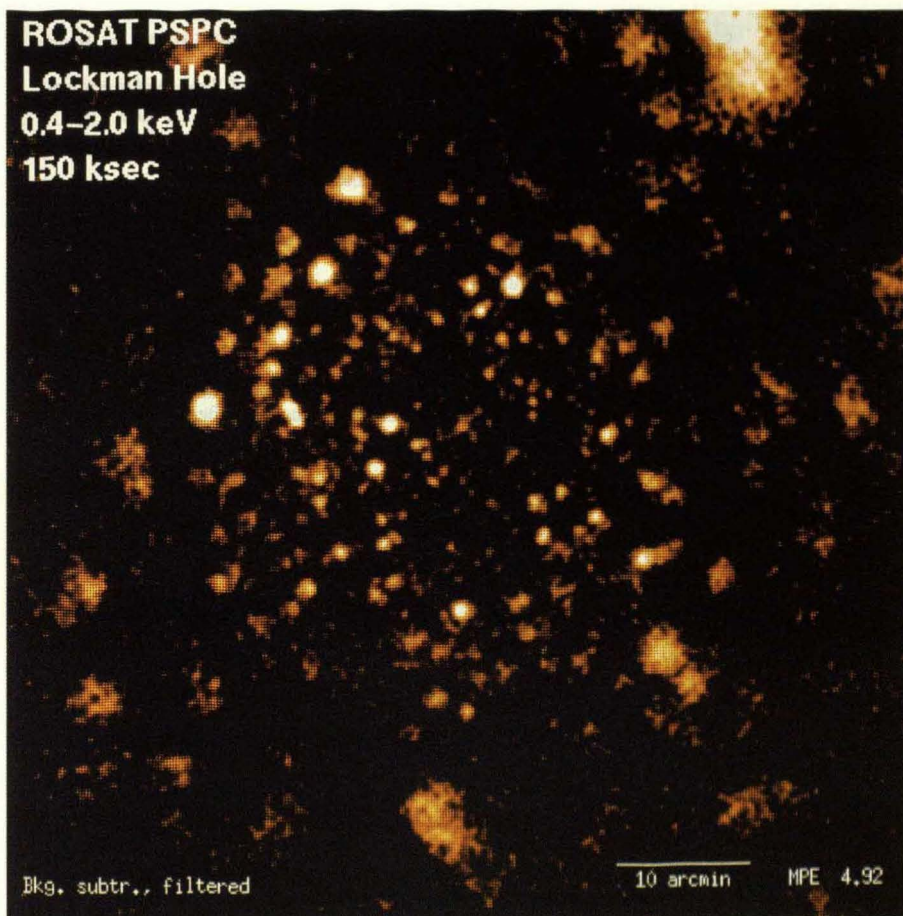


Abb. 15:

Röntgenabbildung eines Feldes im Großen Wagen mit 42 Stunden Beobachtungszeit.  
Im zentralen Bereich des Bildes wurden etwa 180 Quellen gefunden.

<i>Deutschland:</i>	Satellit	Dornier / Messerschmidt-Bölkow-Blohm
	Bodenstation	Weilheim / German Satellite Operation Center der Deutschen Luft- und Raumfahrt (DLR)
	Röntgenspiegelsystem	Carl Zeiss, Oberkochen
	Fokalinstrumentierung inkl. 2 PSPCs	Max-Planck-Institut für Extraterrestrische Physik (MPE), Garching
	wissenschaftl. Datenzentrum	MPE Garching
	deutsches XUV-Datenzentrum	Astronomisches Institut Tübingen
	Projektmanagement	DLR und Deutsche Agentur für Raumfahrtangelegenheiten
	wissenschaftliche Leitung	MPE Garching
<i>England:</i>	Wide Field Camera (XUV-Teleskop)	University of Leicester und ein Konsortium englischer Institute
	Kostenbeteiligungen am Satelliten	Science and Engineering Research Council
<i>USA:</i>	ein Fokalinstrument (HRI)	Smithsonian Astrophysical Observatory / Goddard Space Flight Center
	Start des Satelliten	National Aeronautics and Space Administration

Tabelle 1: Zusammenarbeit bei ROSAT

## Die Himmelsdurchmusterung

Eines der wichtigsten Ziele von ROSAT war, zum ersten Mal mit einem abbildenden Röntgenteleskop den ganzen Himmel zu durchmustern. Dieser Teil der Mission dauerte nur ein halbes Jahr und wurde im Februar 1991 erfolgreich abgeschlossen. Dabei konnten Quellen erfaßt werden, deren Intensität hundertmal schwächer waren als die schwächsten Quellen bisheriger Röntgensurveys. Entsprechend reich ist die wissenschaftliche Ausbeute:

Die vorläufigen Auswertungen lassen erwarten, daß mit der ROSAT-Durchmusterung mehr als 60.000 Röntgenquellen registriert und lokalisiert wurden – ein Quantensprung im Vergleich mit dem bisher umfangreichsten „all sky survey“, der mit dem

Gesamtzahl der ROSAT-Quellen	ca.	60.000
Normale Sterne	ca.	25.000
Aktive Galaktische Kerne, Quasare	ca.	30.000
Galaxienhaufen	ca.	5.000
Normale Galaxien	ca.	650
Röntgendoppelsterne	ca.	1.000
Supernovaüberreste	ca.	150

*Tabelle 2: ROSAT-Himmelsdurchmusterung*

HEAO-1 Satelliten gemacht wurde und 840 Quellen ergab. Die Abbildungen 2a und 2b vergleichen den alten und den neuen Röntgenhimmel. Zu den neuentdeckten Quellen gehören fast alle bekannten Arten astrophysikalischer Objekte (Tabelle 2). Vielleicht noch wichtiger als der quantitative Fortschritt ist der Gewinn an Qualität. Abb. 3 zeigt ein kleines Stück ( $\approx 1\%$ ) des ROSAT-Himmels in der Nähe des galaktischen Zentrums im Detail. Man erkennt neben den hellen Quellen, bei denen es sich um Röntgendoppelsterne handelt, viele schwache Objekte, vorwiegend normale Sterne. Rechts im Bild ist eine berühmte Supernovaexplosionswolke zu sehen. Sie stammt von Keplers „Nova“ (1604) und ist die letzte Supernova in unserer Milchstraße, die mit bloßem Auge gesehen wurde. Daneben sind weiträumige Strukturen diffuser Emission zu sehen, welche vom heißen interstellaren Gas herrühren, das durch Supernovaexplosionen erzeugt wird, und eine Temperatur von etwa einer Million Grad besitzt. Einige hellere „Fetzen“ diffuser Emission dürften Überbleibsel von sehr alten Supernovaexplosionswolken sein. Die direkte Abbildung dieser diffusen Emission des heißen interstellaren Mediums ist zum ersten Mal mit ROSAT ermöglicht worden. Bei früheren Beobachtungen „versanken“ derartig leuchtschwache Strukturen im Eigenrauschen der Bilddetektoren.

### **Detailbeobachtungen**

Im Anschluß an die Himmelsdurchmusterung, also während der letzten zweieinhalb Jahre, ist der Satellit für Detailbeobachtungen einzelner Quellen eingesetzt worden. Die Beobachtungszeit wird dabei, wie in der Astronomie üblich, ausgeschrieben und verteilt sich auf viele Gastbeobachter. Insgesamt wurden bisher etwa 4.000 Einzelbeobachtungen ausgeführt.

Auch in diesem Beobachtungsprogramm bringt ROSAT wesentliche Verbesserungen im Vergleich mit seinen Vorgängern, und zwar hinsichtlich der Empfindlichkeit (Faktor 3–10), der Winkelauflösung (Faktor 2–5), der spektralen Bildauflösung (Faktor 3) und



vor allem hinsichtlich des Detektorhintergrundes (Faktor 20!). Die Hintergrundeffekte sind so klein, daß in einem Bildelement des PSPC nur ein einziges Quant pro Tag vorge-täuscht wird!

Insgesamt haben die ROSAT-Himmelsdurchmusterung und die Detailbeobachtungen eine Ernte erbracht, die in ihrer Quantität und Qualität alles in den Schatten stellt, was bisher mit abbildenden Röntgenteleskopen gefunden wurde. Ich kann im folgenden nur auf einige Highlights aus dieser Vielfalt eingehen.

## Sterne

Die ROSAT-Durchmusterung gestattet zum ersten Mal, größere Areale des Himmels in homogener Weise und in beträchtlichem Detail darzustellen. Als Beispiel ist in Abb. 4 ein Ausschnitt aus dem Orion wiedergegeben, dessen drei Gürtelsterne massereiche heiße Objekte mit starken Sternwinden sind. Ihre Röntgenstrahlung stammt vermutlich aus den Stoßwellenregionen, die beim Aufprall der Winde auf das umgebende interstellare Medium entstehen. Unter dem Gürtel ist das „Schwert“ erkennbar, das aus der optischen und Infrarot-Astronomie als Sternentstehungsgebiet bekannt ist. Die starke diffuse Röntgenemission aus diesem Bereich ist ebenfalls vorwiegend auf massereiche heiße Sterne zurückzuführen. Einige von ihnen mögen bereits ihre thermonukleare Brennphase durchlaufen haben, explodiert sein und dabei heißes Plasma produziert haben. Daneben weist die Region eine größere Zahl von weiteren Quellen auf, darunter den hellen Stern Bellatrix, der ebenfalls zum Sternbild des Orion gehört. Insgesamt dürften in der Durchmusterung 15–20.000 normale Sterne enthalten sein. In den meisten Fällen handelt es sich allerdings nicht um heiße, sondern um kühle Sterne. Diese besitzen wie unsere Sonne eine heiße röntgenstrahlende Korona, die durch die Konvektion in den äußeren Schichten hervorgerufen wird.

## Supernovaüberreste

Zu den schönsten Objekten am Röntgenhimmel gehören die Supernovaüberreste. Sie markieren die Stellen, an denen vor tausenden bis hunderttausenden von Jahren Sterne am Ende ihrer Entwicklung als Supernova explodiert sind. Diese Explosionswolken weisen eine Temperatur von Millionen Grad auf und sind deshalb intensive Röntgenstrahler.

Abb. 5 zeigt die Explosionswolke, die durch Tycho's „Nova“ (1572) erzeugt wurde. Sie besitzt einen Radius von etwa 10 Lichtjahren und eine Temperatur von 5 Millionen Grad. Ein Vergleich der Bilder des Einstein-Observatoriums und von ROSAT, die 1979 bzw. 1990 gemacht wurden, erlaubt, die Expansionsgeschwindigkeit zu bestimmen. Dabei zeigt sich, daß die Expansion bereits deutlich gebremst ist. Ein Neutronenstern konnte bisher – auch mit ROSAT – nicht gefunden werden.

Besonders eindrucksvoll sind die ROSAT-Aufnahmen alter, räumlich sehr ausge-dehnter Supernovaüberreste, die im Zuge der Himmelsdurchmusterung gemacht wur-

den. Dabei konnten diese Objekte zum ersten Mal als Ganzes kartiert und die Temperatur- und Druckverteilung des heißen Plasmas bestimmt werden. Ein Beispiel ist der Supernoväüberrest im Sternbild Vela (Segel), der in Abb. 6 dargestellt ist.

Man erkennt, daß die nördlichen Bereiche viel kühler und dichter sind als der südliche Teil, dessen relativ schwache Emission überhaupt zum ersten Mal von ROSAT erfaßt wurde.

Neu entdeckt wurden mit ROSAT auch die Ausbuchtungen, die vor der Stoßfront im Osten, Norden und Westen der Supernovawolke zu sehen sind. Dabei handelt es sich wahrscheinlich um Mach-Kegel, die von Materieklumpen hervorgerufen werden, welche eine höhere Geschwindigkeit haben als die mittlere Stoßfront. Die Symmetrieachsen dieser Emissionsstrukturen schneiden sich im Zentrum der Supernovahülle, dort wo im Bild eine blaue Emissionsregion zu sehen ist. Diese kompakte „blaue“ Quelle stellt einen „Synchrotronnebel“ dar, der den seit langem aus dem Radiobereich bekannten Vela-Pulsar (Periode 89 ms) umgibt. Mit ROSAT konnte zum ersten Mal gepulste Röntgenemission dieses Pulsars gesehen werden; die Röntgenstrahlung stammt vermutlich von der heißen Polkappe (1.6 MioK) des Neutronensterns, der wie die Explosionswolke etwa 14.000 Jahre alt ist.

Der bekannteste Synchrotronnebel ist der Crabnebel, der durch die „chinesische“ Supernova im Jahre 1054 entstanden ist. In dem ROSAT-HRI-Bild des Crab (Abb. 7) sieht man neben dem 33 msec Pulsar als zentraler Punktquelle interessante räumlich ausgedehnte Strukturen, bei denen es sich um Synchrotronemission von sehr hochenergetischen Elektronen ( $10^{14}$  eV) handelt. Diese Strukturen spiegeln direkt die Elektronenstrahlgeometrie des Neutronensterns wider, die damit zum ersten Mal deutlich sichtbar gemacht wird. Eine thermisch strahlende Explosionswolke wie bei Vela konnte um den Crabnebel herum trotz intensiver Suche auch mit ROSAT nicht gefunden werden.

Bisher waren im Röntgenbereich 46 Supernoväüberreste bekannt. Durch die ROSAT-Durchmusterung wurden etwa 90 weitere Exemplare gefunden. Ein Beispiel ist in Abb. 8 zu sehen: Neben zwei bekannten und vielstudierten Quellen – es handelt sich um Capella und den Supernoväüberrest HB9 – wurde nur wenige Grad davon entfernt mit ROSAT ein neuer Supernoväüberrest entdeckt, mit  $1.5^\circ$  Durchmesser und einer fast perfekt runden Form, ein wahres Prachtexemplar [6]. Weder auf den optischen noch auf den Radiokarten war an dieser Stelle etwas Besonderes zu sehen. Inzwischen haben unsere Kollegen vom MPI für Radioastronomie dort mit dem 100 m-Radioteleskop eine „Schalenquelle“ gefunden. Bei der Radiostrahlung handelt es sich um Synchrotronstrahlung lokal beschleunigter Elektronen, während man im Röntgenbereich direkt das heiße Plasma der Explosionswolke sieht.

## Die Magellan'schen Wolken

Das „First Light“ von ROSAT wurde am 16. Juni 1990 mit einer Beobachtung der Großen Magellan'schen Wolke (LMC) zelebriert, wobei für uns die Frage im Vordergrund stand, ob die Supernova 1987A sichtbar wäre, die erste nahe Explosion seit Kep-

lers Supernova im Jahre 1604 [7]. Ein halbes Jahr nach dem Aufleuchten hatten wir mit der „HEXE“ auf der MIR-Station harte Röntgenstrahlung von SN 1987A entdeckt (20–200 KeV), aus der man auf das in der Supernova produzierte radioaktive Nickel 56 schließen konnte [8]. Fast gleichzeitig hatten wir versucht, während einer 5minütigen Raketenbeobachtung mit einem Vorläufer des ROSAT-Teleskops weiche Röntgenstrahlung der Supernova nachzuweisen. Obwohl alles gut funktionierte, wurde jedoch kein Röntgenquant von der Supernova gefunden [9]. So waren wir gespannt, was uns ROSAT mit seiner viel größeren Sammelfläche und einigen Stunden Beobachtungszeit bringen würde. Die erste Beobachtung klappte wie am Schnürchen, jedoch war im ROSAT-Bild (Abb. 9) von der SN 1987A wiederum keine Spur zu sehen [7]. Auch die Durchmusterung, in der diese Region von September bis Oktober 1990 beobachtet wurde, und einige weitere, lange Pointierungen brachten bisher lediglich Nullresultate. Offenbar ist die thermische Röntgenemission, die man von der Explosionsstoßwelle erwartet, noch unter der Nachweisgrenze, und gleichzeitig ist die expandierende Hülle noch zu dick, um den Blick auf den jungen Neutronenstern freizugeben, der ein starker Röntgenstrahler sein sollte.

Im übrigen brachten diese ersten Beobachtungen eine reiche Ausbeute. So wurden im Zentralgebiet der LMC insgesamt 45 Röntgenquellen gefunden. Die hellste Quelle im Bild ist LMC X-1 ein Röntgendoppelstern mit Massenakkretion auf ein kompaktes Objekt, bei dem es sich wahrscheinlich um ein Schwarzes Loch handelt. Die ROSAT-Aufnahme zeigt auch zum ersten Mal die detaillierte Struktur der diffusen Röntgenemission der Großen Magellan'schen Wolke. Sie stammt von einem heißen Plasma ( $10^6$  K), das vermutlich im wesentlichen durch Supernovaexplosionen geheizt wird. Besonders hell ist der 30-Doradus-Komplex, auch Tarantelnebel genannt, eine bekannte Sternentstehungsregion, dessen diffuse Röntgenemission von jungen heißen Sternen bzw. ihren Supernovaexplosionswolken herrühren dürfte. Diese Interpretation wird durch die Tatsache gestützt, daß die hellste Quelle im Tarantelnebel ein Supernovaüberrest ist.

Als besonders interessant erwiesen sich zwei sehr helle Objekte, die im ROSAT-Bild eine lila Farbe haben. Eine dieser „superweichen“ Quellen war seit langem bekannt und als Doppelsternsystem identifiziert [10]. Aber aufgrund der guten Spektralauflösung von ROSAT zeigte sich erstmals, daß sie eine ganz besonders niedrige Temperatur besitzt: 400–500 tausend Grad. Dabei ist ihre Energieabstrahlung mit  $10^{31}$  Watt so hoch wie bei den hellsten Röntgendoppelsternen, deren Temperatur jedoch um einen Faktor 100(!) größer ist [10].

Für die andere superweiche Quelle ergaben sich ähnliche Werte, nur daß diese Quelle vor ROSAT nicht sichtbar gewesen war. Im weiteren Verlauf fanden wir in der Großen Magellan'schen Wolke noch zwei weitere derartige Quellen, von denen eine während der Durchmusterung aus dem Nichts heraus aufleuchtete. Auch in der Kleinen Magellan'schen Wolke haben wir vier dieser merkwürdigen Objekte gefunden, neben einigen weiteren in anderen nahen Galaxien.

Zwar ist die genaue Natur dieser Quellen noch nicht endgültig geklärt; aber aufgrund der großen Leuchtkraft kommen nur Röntgendoppelsterne in Betracht. Die Frage ist dann, ob der röntgenemittierende Begleiter ein Weißer Zwerg, ein Neutronenstern oder



ein schwarzes Loch ist. Inzwischen mehren sich die Anzeichen, daß Weiße Zwerge dahinterstecken [11]. Derartige „kataklysmische Variable“ sind zwar seit langem bekannt, aber ihre Röntgenabstrahlung ist viel niedriger ( $10^{27}$  Watt) und die Temperaturen viel höher (50 Millionen Grad) als die der superweichen Quellen.

Worin besteht der Unterschied? Bereits in den siebziger Jahren hatten Theoretiker darauf hingewiesen, daß es bei hohen Massenübergangsraten auf der Oberfläche des Weißen Zwerges zur stationären Kernfusion kommen kann [12, 13]. Die erforderlichen Raten liegen je nach Masse des Weißen Zwerges in einem engen Intervall, nämlich zwischen  $10^{-7}$  und  $4 \times 10^{-7} M_{\odot}$  /Jahr. Sind sie kleiner, so kommt es nicht zur stationären Verbrennung. Ist die zugeführte Masse zu groß, schwillt die Brennzzone an und entwickelt sich zur Hülle eines Roten Riesen, die alles unter sich begräbt. Die Vermutung ist also, daß es sich bei den superweichen Quellen von ROSAT gewissermaßen um Fusionsreaktoren handelt: Dies ist eine interessante astrophysikalische Situation, denn im allgemeinen findet ja die Fusion unsichtbar tief im Inneren der Sterne statt.

Derartige Objekte sind aber noch aus einem ganz anderen Grund bedeutsam: bei den Massenübertragungsraten dauert es nur wenige Millionen Jahre, bis der Weiße Zwerg seine obere Grenzmasse ( $1.4 M_{\odot}$ ), die Chandrasekhar-Grenze, erreicht hat. Er muß dann kollabieren, was zu einer Supernova-Explosion vom Typ Ia Anlaß gibt. Supernova-Explosionen dieses Typs sind dafür bekannt, daß sie sehr einheitliche Lichtkurven haben, weshalb sie sich besonders gut für kosmologische Entfernungsbestimmungen eignen.

## Der Andromedanebel

Der Andromedanebel (M31) gehört zur lokalen Gruppe und ist unserer Milchstraße hinsichtlich Spiralstruktur und Größe sehr ähnlich. Mit dem Einstein-Observatorium wurden in M31 knapp hundert helle Röntgenquellen registriert [14]. Im Sommer 1991 wurde diese Galaxie mit ROSAT beobachtet, wobei insgesamt etwa 400 Quellen gefunden wurden (Abb. 10). Ein kleiner Teil davon konnte bisher mit optischen Objekten identifiziert werden, unter ihnen 26 Röntgenquellen in Kugelsternhaufen. Dabei handelt es sich um Röntgendoppelsterne, die auf seltsame Weise entstehen, nämlich durch den Einfang eines Neutronensterns durch einen massearmen Stern. Auch einige Supernoväüberreste gehören zu den identifizierten Quellen. Vor allem aber befinden sich unter den Röntgenquellen im Andromedanebel einige der superweichen Quellen, die im vorigen Abschnitt diskutiert wurden.

Übrigens ist die Gesamtzahl der ROSAT-Quellen im Andromedanebel größer als die Zahl der Objekte, die der Röntgensatellit Uhuru in der ersten Himmelsdurchmusterung 1972 am ganzen Himmel entdeckte. Bei den Uhuru-Quellen handelte es sich um die hellen Röntgendoppelsterne und Supernovawolken unserer Milchstraße. Mit ROSAT sehen wir im wesentlichen die gleichen Objekte in einer Galaxie, die 2 Millionen Lichtjahre entfernt ist. Nichts verdeutlicht besser den enormen Fortschritt, den die Röntgenastronomie in den letzten 20 Jahren gemacht hat.

## Starburst-Galaxien

In normalen Galaxien ereignen sich einige wenige Supernovaexplosionen pro Jahrhundert, die die galaktische Scheibe mit heißem Gas, also „thermischem“ Plasma und kosmischer Strahlung, also „relativistischem“ Plasma füllen. In den sogenannten Starburst-Galaxien ist die Supernovarate erheblich größer. Dies führt zu einem Überdruck des thermischen und des relativistischen Plasmas, der zu einem Entweichen aus der Scheibe führt. Bei verschiedenen Starburst-Galaxien gibt es Beobachtungshinweise auf „Schornsteine“, durch die das Material nach außen entkommt und auch auf Halos, die sich daraus oberhalb der Scheibe bilden. Eine der offenen Fragen ist dabei, welches die dominierende Komponente ist. Reißt das thermische Plasma die relativistischen Teilchen und die Magnetfelder mit, oder ist es umgekehrt?

Bei NGC 253 fand man mit dem Einstein-Observatorium heißes Plasma bis zu einer Höhe von 4000 Lichtjahren über der galaktischen Scheibe. Mit ROSAT ist es nun möglich geworden, diesen galaktischen Halo zum ersten Mal in voller Pracht zu sehen (Abb. 11). Die Emission erstreckt sich bis hin zu einer Höhe von 30.000 Lichtjahren. Die Strahlung stammt von einem heißen Plasma, dessen Temperatur zwei Millionen Grad und dessen Dichte  $2 \times 10^{-3}$  Atome/cm<sup>3</sup> ist. Die Masse dieses gewaltigen Gebildes beträgt mindestens  $5 \times 10^6 M_{\odot}$  [15].

Interessanterweise ist bei NGC 253 ein Halo ähnlicher Größe kürzlich auch mit dem „Very Large Array“ im Radiobereich entdeckt worden, wobei die Emission durch Synchrotronstrahlung relativistischer Elektronen entsteht [16]. Dies eröffnet die Möglichkeit, die Energiedichte bzw. den Druck der relativistischen Teilchen zu bestimmen und mit den entsprechenden Werten zu vergleichen, die sich aus den ROSAT-Daten für das thermische Plasma ergeben. Wir fanden, daß der Druck des thermischen Plasmas etwa zwanzig mal größer ist, und das bedeutet, daß das Plasma die relativistischen Teilchen und Magnetfelder mitnimmt.

Eine andere Frage ist, wie groß die Masse der Galaxie sein muß, um den Halo gravitativ zu binden. Dabei ergibt sich ein Wert von  $5 \times 10^{10} M_{\odot}$ , was in recht guter Übereinstimmung ist mit den Massewerten, die man mit Hilfe des 3. Kepler'schen Gesetzes aus den Rotationskurven der Galaxie ableitet. Diese Masse ist erheblich größer als die in Form von Sternen sichtbare Masse, d.h. die Existenz dunkler Materie findet hier eine neue und unabhängige Bestätigung.

## Galaxienhaufen

Bekanntlich sind die Galaxien im Kosmos nicht statistisch gleichmäßig verteilt, sondern z. T. in Galaxienhaufen versammelt. Dabei handelt es sich um die größten physikalischen Gebilde, und es ist seit langem bekannt, daß sie starke, räumlich ausgedehnte Röntgenquellen sind. Ihre Röntgenemission stammt von einem heißen Plasma, das bei Kollisionen von Galaxien aus diesen herausgefeht und aufgeheizt wurde und im Gravitations-Potentialtopf des Haufens gefangen ist. Zusätzlich fällt primordiales Gas von

Tabelle 3: Masse des heißen Plasmas und Gravitationsmasse von Galaxienhaufen [20]

Haufen	$R_x$ (Mpc)	$M_{\text{grav}}$ ( $10^{14}M_\odot$ )	$M_{\text{gas}}$ ( $10^{14}M_\odot$ )	$M_{\text{gas}}/M_{\text{grav}}$
Perseus	3.0	10–26	3.2–4.3	0.13–0.43
Coma	4.0	11–28	3.8–4.8	0.14–0.44
M87 halo	1.8	1.3–6.6	0.3–0.4	0.05–0.31
Centaurus	1.5	1.9–3.8	0.25–0.5	0.13–0.27
A 2256	4.0	12–46	3.9–4.0	0.12–0.45

außen in den Haufen ein und wird dabei erhitzt. Abb. 12 zeigt das PSPC-Bild des Galaxienhaufens Abell 2256, der eine Milliarde Lichtjahre entfernt ist und auf optischen Platten 170 Galaxien erkennen läßt [17]. Die Röntgenemission besitzt eine deutliche Doppelstruktur, d. h. es handelt sich eigentlich um zwei Haufen. Der linke Teilhaufen ist auf eine cD-Galaxie, also einer Riesengalaxie, zentriert. Vermutlich ist dieses Objekt im Zuge von Zusammenstößen auf Kosten seiner Stoßpartner gewachsen – ein Phänomen, das in Galaxienhaufen häufig auftritt und für das der Begriff „galaktischer Kannibalismus“ geprägt wurde. Das rechte Maximum, so zeigen nähere Untersuchungen der Röntgen- und der Radioemission, ist ein kleinerer Galaxienhaufen, der infolge der Massenanziehung auf den großen Haufen fällt.

Ein anderes Beispiel für einen solchen Vereinigungsprozeß ist der Coma-Haufen (Abb. 13), auf den offenbar ebenfalls ein kleinerer Haufen einstürzt. Auch der Coma-Haufen selbst, also das große Gebilde, besitzt eine innere Struktur, die auf frühere, noch „unverdaute“, Vereinigungsprozesse hindeutet [18]. ROSAT-Untersuchungen an anderen Objekten zeigen, daß diese Unterstrukturen in Galaxienhaufen eher die Regel als die Ausnahme sind. Sie sind ein direkter Beweis für die Hypothese einer hierarchischen Entwicklung der großen Strukturen, bei der die großen Einheiten durch die Vereinigung kleinerer Gebilde anwachsen [19].

Ähnlich wie bei dem Galaxienhalo von NGC 253 kann man fragen, wieviel Masse in dem heißen Plasma steckt, das für die Röntgenemission verantwortlich ist, und wieviel Masse vorhanden sein muß, um dieses heiße Gas gravitativ zu binden. Die Ergebnisse solcher Analysen sind in Tabelle 3 zusammengestellt [20]. Das besondere an diesen Untersuchungen ist, daß ROSAT es gestattet, die Emission des heißen Plasmas bis zu großen Radien ( $R_x$ ) zu messen. Die dabei gefundenen Massen des heißen Gases betragen bis zu einigen 100 Billionen Sonnenmassen, und diese Werte stellen typisch 10–40 % der gravitierenden Masse dar. Ein weiteres Ergebnis ist, daß die Masse des heißen Plasma die der sichtbaren Galaxien um etwa das Fünffache übersteigt, d. h. daß letztere eigentlich völlig unbedeutend in der gesamten Massenbilanz sind. Die meiste Masse (60–90 %) ist bisher unentdeckt und stellt somit „dunkle Materie“ dar.



Schließlich kann man mit Hilfe von Untersuchungen an Galaxienhaufen Kosmographie treiben, also die raumzeitliche Materieverteilung im Kosmos untersuchen. Von der ROSAT-Durchmusterung wird erwartet, daß sie alle Galaxienhaufen bis zu Rotverschiebungen von  $z = 0.3$  (entsprechend Entfernungen bis zu etwa 4 Milliarden Lichtjahren) zu entdecken gestattet, wobei es sich insgesamt um einige tausend Objekte handeln dürfte. Da die Galaxienhaufen lokale Dichtemaxima in der kosmischen Materieverteilung markieren, ist die Messung ihrer großräumigen Verteilung und Evolution von großem kosmologischen Interesse. Bei diesem langfristigen Programm, das einige Jahre dauern wird, geht es letztlich um die bisher ungeklärte Frage, wie sich aus dem so überaus homogenen und isotropen Feuerball des Urknalls die beobachteten großräumigen Strukturen entwickelt haben.

### **Quasare und die kosmische Hintergrundstrahlung im Röntgenbereich**

Noch größere Raumbereiche, nämlich bis zu Entfernungen von mehr als 10 Milliarden Lichtjahren, erschließen sich durch Untersuchungen von Quasaren, die das größte Kontingent der ROSAT-Survey-Quellen darstellen. Soweit man heute weiß, besitzen alle Quasare eine starke Röntgenemission, während die Radioemission bei der Mehrzahl unbeobachtbar ist („radioleise Quasare“). Die Messung der Röntgenstrahlung bietet deshalb eine besonders wichtige Möglichkeit, Quasare in einem Gewimmel von Sternen und Galaxien am Himmel zu finden. Allerdings braucht man, und das gilt auch für die Galaxienhaufen, optische Nachfolgebeobachtungen, um die Objekte zu identifizieren und anhand der Rotverschiebung ihre Entfernung zu bestimmen. Mit entsprechenden Beobachtungsprogrammen haben wir angefangen. Wir erhoffen uns davon neue Aufschlüsse über die kosmologische Verteilung der Quasare und damit über die Raum-Zeit-Struktur unseres Universums bzw. die Entwicklung dieser Objekte.

Ein weiterer wichtiger Aspekt ist, daß mit der Himmelsdurchmusterung zum ersten Mal sehr große Zahlen von Quasaren und anderen aktiven Galaxien verfügbar werden, an denen synoptische Studien der Radio-, Infrarot-, optischen und Röntgeneigenschaften angestellt werden können. Man kann hoffen, dadurch weitere Hinweise auf die physikalische Natur der extremen Energieumsetzungen in diesen Objekten zu gewinnen. Beispielsweise besitzt der hellste Quasar, 3C 273, eine Gesamtenergieabstrahlung von etwa  $10^{14}$  Sonnen oder tausend Milchstraßen. Aus der Zeitvariabilität der Strahlung kann man schließen, daß das Emissionsgebiet sehr klein ist, nämlich nicht viel größer ist als unser Planetensystem. Das bevorzugte Modell ist deshalb ein supermassives Schwarzes Loch (bei 3C 273 etwa  $10^9 M_\odot$ ), das Materie mit einer großen Rate (etwa eine Erdmasse/sec) akkretiert. Dabei muß die Röntgenemission aus den inneren, heißen Bereichen der Akkretionsregion stammen, also von Materie emittiert werden, kurz bevor diese im Schwarzen Loch verschwindet. Man darf gespannt sein, was sich in diesem Zusammenhang aus den ROSAT-Beobachtungen an Neuem ergibt.

Wie in anderen Spektralbereichen, wird auch im Röntgenbereich eine quasi-isotrope Strahlung beobachtet, die aus den Tiefen des extragalaktischen Raumes stammt. In

Abb. 14 sieht man die Abschattung dieser Hintergrundstrahlung durch den Mond [21]. Eine offene Frage war für lange Zeit, ob es sich dabei um die Strahlung vieler, mit den derzeit verfügbaren Instrumenten noch nicht aufgelöster ferner Quasare und Galaxienhaufen handelt oder um die diffuse Emission eines heißen intergalaktischen Gases. Um diese Frage zu klären, muß man offenbar sehr „tiefe“ Beobachtungen machen, d. h. die Hintergrundstrahlung in Punktquellen aufzulösen versuchen. Bereits während der frühen Kalibrationsphase hatten wir mit ROSAT die bis dahin „tiefste“ Beobachtung gemacht [22]. Später folgte eine noch längere (150.000 sec, Abb. 15) an einer Position im Großen Wagen, die einen besonders freien Blick aus der Milchstraße heraus gestattet. Damit wurden die Beobachtungsgrenzen gegenüber früheren Messungen um einen Faktor zehn hinausgeschoben. Eine vorläufige Auswertung ergibt, daß mindestens 75 % der Hinter-

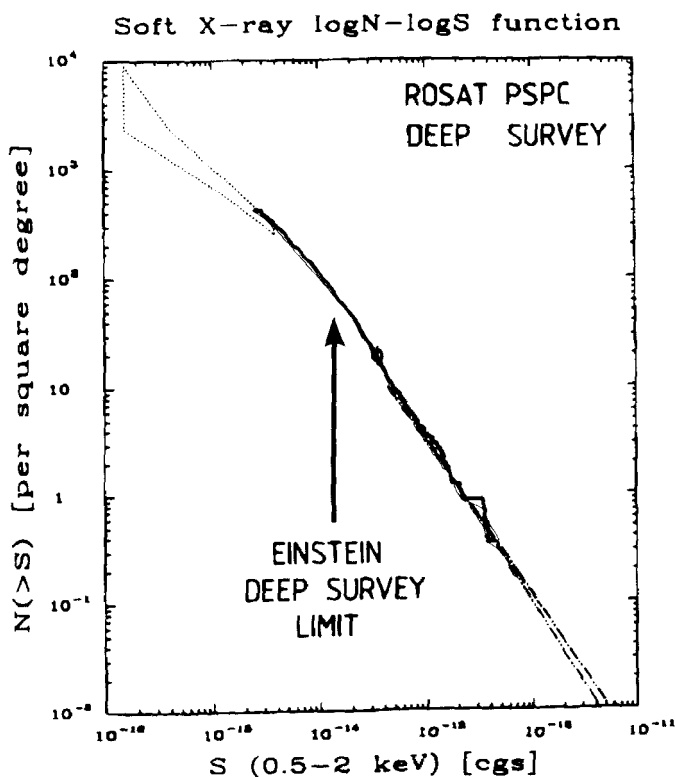


Abb. 16

Abhängigkeit der Zahl der Quellen pro Quadratgrad von der Röntgenintensität der Quellen. Eingezeichnet ist auch die bisherige Maßgrenze, die mit dem Einstein-Observatorium erreicht wurde.

grundstrahlung in Punktquellen aufgelöst wird. Dabei werden mehr als 400 Quellen pro Quadratgrad gezählt! Der größte Teil dieser Objekte sind Quasare bei Rotverschiebungen von  $z = 1$  bis 2. Damit ist das Problem des diffusen Röntgenhintergrunds weitgehend gelöst [23].

Von besonderem Interesse ist, wie die Zahl der Quellen am Himmel mit abnehmender Röntgenintensität zunimmt. Für eine homogene Verteilung von einem euklidischen Universum gilt für die Zahl  $N$  der Quellen mit einem Fluß größer als  $S$

$$N(> s) \sim S^{-3/2},$$

weil die Intensität proportional zum Quadrat der Entfernung  $d$  abfällt ( $d^{-2}$ ), während das beobachtete Volumen mit  $d^3$  anwächst.

Die tiefsten Beobachtungen mit dem Einstein-Observatorium ergaben Werte für den Exponenten nahe bei  $-3/2$ . Die ROSAT-Messungen zeigen zum ersten Mal, daß sich beim Übergang zu noch schwächeren Quellen die Kurve abflacht (Abb. 11). Dies ist entweder auf die Raumkrümmung oder auf eine zeitliche Evolution der Quasare in den frühen Epochen der kosmischen Expansion zurückzuführen.

Ein besonderes Problem bei diesen Untersuchungen ist die Identifizierung der schwachen Röntgenobjekte durch optische Nachbeobachtungen und die Bestimmung ihrer Rotverschiebung, also der Entfernung. Dazu wurden die leistungsfähigsten Teleskope genutzt, vor allem der 5 m-Spiegel auf dem Mt. Palomar. Es ist jedoch praktisch unmöglich, damit die Quellen zu erfassen, deren Röntgenfluß kleiner als etwa  $10^{-14}$  erg/cm<sup>2</sup>s ist (vgl. Abb. 16). Wir warten deshalb derzeit auf die nächste Generation von optischen Großteleskopen, um den Vorstoß ins Unbekannte fortzusetzen.

## Literatur

- [1] Giacconi, R. et al.: Phys. Rev. Lett. **9**, 439 (1962).
- [2] Forman, W. et al.: ApJ. Suppl. **38**, 357 (1978).
- [3] Wolter, H.: Annalen der Physik **10**, 94 (1952).
- [4] Trümper, J. E.: Physikalische Blätter **46**, 197 (1990).
- [5] Aschenbach, B., COSPAR meeting Washington, Symp.-E2, submitted to Advance in Space Research (1993)
- [6] Pfeffermann, E. et al.: Astron. and Astrophys. Letters **246**, L28–L31 (1991)
- [7] Trümper, J. E. et al.: Nature **349**, 579, (1991)
- [8] Sunyaev, R. et al.: Nature **330**, 227 (1987).
- [9] Aschenbach, B. et al.: Nature **330**, 232 (1987)
- [10] Greiner, J. et al.: Astron. and Astroph. Letters **246**, L1–L20 (1991)
- [11] van den Heuvel, E. P. J. et al.: Astron. Astrophys. **262**, 87 (1992).
- [12] Paczynski, B., and Zytlow, A. N.: ApJ. **222**, 604 (1978).
- [13] Iben, I.: ApJ. **259**, 244 (1982).
- [14] Fabbiano, G. et al.: ApJ. **316**, 127 (1987).
- [15] Pietsch, W., and Trümper, J.: to be published in Astron. Astrophys. (1993).
- [16] Carilli, C. L. et al.: ApJ **399**, L59 (1992).
- [17] Briel, U. et al.: Astron. and Astroph. Letters **246**, L10–L13 (1991).



- [18] White, S. D. M. et al.: Mon. Not. R. Astron. Soc. **261**, L8 (1993)
- [19] Henry, J. P., and Briel, U. G.: COSPAR meeting Washington, Symp.-E2, submitted to Advance in Space Research (1993).
- [20] Böhringer, H.: COSPAR meeting Washington, Symp.-E2, submitted to Advance in Space Research (1993).
- [21] Schmitt, J. H. M. M. et al.: Nature **349**, S. 583–587 (1991).
- [22] Hasinger, G. et al.: Astron. and Astroph. Letters **246**, L2–L5 (1991)
- [23] Hasinger, G. et al.: submitted to Astron. Astrophys. (1993)

---

Prof. Dr. Joachim Trümper  
Max-Planck-Institut für extraterrestrische Physik  
Gießenbachstraße · D-85740 Garching